

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LUCAS DE LIMA STABILE

**ESTUDO SOBRE FALHAS MECÂNICAS E DEFEITOS DE
MATERIAIS METÁLICOS EMPREGADOS EM PROCESSOS DA
INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS**

São José dos Campos

2020

LUCAS DE LIMA STABILE

**ESTUDO SOBRE FALHAS E DEFEITOS DE MATERIAIS METÁLICOS
EMPREGADOS EM PROCESSOS DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Profa. Dra. Aline Capella de
Oliveira

São José dos Campos

2020

LUCAS DE LIMA STABILE

**ESTUDO SOBRE FALHAS MECÂNICAS E DEFEITOS DE MATERIAIS
METÁLICOS EMPREGADOS EM PROCESSOS DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E
GÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^ª. Dra. Aline Capella de Oliveira

Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP - ICT

Orientadora

Dr. Walter Miyakawa

Instituto de Estudos Avançados – IEAv - DCTA

Na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei de direitos autorais nº 9610/98, autorizo a publicação livre e gratuita desse trabalho no Repositório Institucional da UNIFESP ou em outro meio eletrônico da instituição, sem qualquer ressarcimento dos direitos autorais para leitura, impressão e/ou download em meio eletrônico para fins de divulgação intelectual, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Stabile, Lucas de Lima

Estudo sobre falhas mecânicas e defeitos de materiais metálicos empregados em processos da indústria de óleo e gás / Lucas de Lima Stabile - 2020

44 f.

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, 2020.

Orientadora: Aline Capella de Oliveira

Título em outro idioma: Study on mechanical failures and defects of metallic materials used on oil and gas industry processes.

1. Industrial de Óleo e Gás. 2. Manutenção. 3. Falhas Mecânicas. 4. Estudos de Caso. I. Oliveira, Aline Capella. II. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais - Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. III. Estudo sobre falhas mecânicas e defeitos de materiais metálicos empregados em processos da indústria de óleo e gás.

Agradecimentos

RESUMO

A indústria de óleo e gás investe boa parte de seus recursos financeiros no entendimento das falhas associadas aos componentes que fazem parte de seu processo, de forma a mitigar seus principais fatores e indicar melhorias. Assim, o setor busca empregar uma manutenção industrial mais adequada ao tipo de falha em seus processos operacionais, evitando novas ocorrências. O objetivo geral deste trabalho é apresentar a importância do estudo de falhas mecânicas na indústria de óleo e gás, a fim de prevenir e/ou corrigir processos que possam acarretar em quebras de equipamentos ou acidentes. Para isto, o projeto busca apresentar os principais defeitos encontrados nos materiais metálicos, empregados nos componentes da indústria de óleo e gás, associados aos tipos de falhas, de forma a criar um entendimento básico sobre os tipos de manutenção que podem ser empregados e utilizados pela indústria. Estudos de casos, sobre falhas recorrentes no setor, são apresentados, considerando a identificação da falha ocorrida no componente em serviço, em condições de alta temperatura, cargas cíclicas, atrito elevado, ambientes corrosivos, entre outros. Resultados mostram que estes são fatores que aumentam número de defeitos no material, ocasionando numa redução geral nas propriedades mecânicas do material, que, em função das tensões aplicadas ao material, levam-no a falhar precocemente. Conclui-se que, devido às condições severas de serviços, nas quais os materiais são submetidos, as pesquisas relacionadas à indústria de óleo e gás são principalmente concentradas no desenvolvimento e aplicação de materiais metálicos mais resistentes às essas condições.

Palavras-chaves: Manutenção Industrial. Óleo e gás. Falhas. Defeitos. Material Metálico. Desenvolvimento e Aplicação

ABSTRACT

The oil and gas industry invests a large part of its financial resources in understanding the failures associated with the components that are part of its process, in order to mitigate its main factors and indicate improvements. Thus, the sector seeks to employ industrial maintenance more suited to the type of failure in its operational processes, avoiding new occurrences. The general objective of this work is to present the importance of studying mechanical failures in the oil and gas industry, in order to prevent and/or correct processes that may result in equipment breaks or accidents. For this, the project seeks to present the main defects found in metallic materials, used in the components of the oil and gas industry, associated with the types of failures, in order to create a basic understanding of the types of maintenance that can be used and used by industry. Case studies on recurrent failures in the sector are presented, considering the identification of the failure that occurred in the component in service, under conditions of high temperature, cyclical loads, high friction, corrosive environments, among others. Results show that these are factors that increase the number of defects in the material, causing a general reduction in the mechanical properties of the material, which, due to the stresses applied to the material, cause it to fail early. It is concluded that, due to the severe service conditions, in which the materials are submitted, the researches related to the oil and gas industry are mainly concentrated on the development and application of metallic materials more resistant to this conditions.

Keywords: Industrial Maintenance. Oil and gas. Failures. Defects. Metallic Material. Developmente and Application

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento da Produção Mundial de Petróleo entre 2008 – 2017.....	15
Figura 2 – Estruturas Cristalinas CFC, CCC e HC.....	19
Figura 3 – Estrutura cristalina com presença de átomo intersticial e vacância.....	20
Figura 4 – Representação da discordância em cunha no final do plano extra de átomos.....	21
Figura 5 – Representação da linha de discordância em hélice “Linha AB”	21
Figura 6 – Tipos de corrosão identificáveis por inspeção visual.....	23
Figura 7 – Tipos de Corrosão que requerem inspeção suplementar.....	23
Figura 8 – Tipos de corrosão que sua inspeção requer micrografia.....	23
Figura 9 – Fluxograma do processo de extração de enxofre.....	29
Figura 10 – Perfil esquemático da broca e identificação de seus componentes conectores.....	32
Figura 11 – Resultado do Método de Cálculo de Conservação de Energia.....	33
Figura 12 – Torque reativo para cada componente da broca considerando efeito da fricção.....	35
Figura 13 – Secção transversal tubo fraturado (a) e tubo controle (b).....	37
Figura 14 – Microscopia da região fraturada (a) e (b) e região oposta (d) e (e).....	37
Figura 15 – Simulação AEF para tubo uniforme (A-A) e tubo não uniforme (B-B)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo de Petróleo por regiões geográficas de 2008 – 2017.....	16
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEF	Análise por Elementos Finitos
ANP	Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
DRX	Difração por Raios-X
kJ	Quilo Joule
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
HC	Hexagonal Compacta
HRB	Dureza Rockwell B
m	Metros
nº	Número
MDAS	Metálicos Desintegrantes de Alta Resistência
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
PEK	Poli(éter-cetona)
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PEKEKK	Poli(éter-cetona-éter-cetona-cetona)

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivos e Justificativas.....	14
3. Revisão da Literatura.....	15
3.1 - Panorama internacional e nacional da produção e consumo de óleo e gás.....	15
3.2 – Manutenção Industrial de Equipamentos.....	17
3.2.1 - Manutenção Corretiva.....	17
3.2.2 - Manutenção Preventiva.....	18
3.2.3 - Manutenção Preditiva.....	18
3.2.4 - Manutenção Detectiva.....	19
3.3 – Defeitos presentes em materiais metálicos.....	19
3.4 – Tipos de Falhas Mecânicas que ocorrem em materiais empregados no setor de óleo e gás.....	22
3.4.1 – Corrosão.....	22
3.4.2 – Fadiga.....	23
3.4.3 - Dano Mecânico e sobrecarga.....	24
3.4.4 – Fratura frágil.....	24
3.4.5 – Defeito de fabricação.....	25
3.4.6 – Defeito de Solda.....	25
4. Material e métodos.....	27

5. Resultados e Discussão.....	28
5.1 – Estudo de Caso 1.....	28
5.2 – Estudo de Caso 2.....	31
5.3 – Estudo de Caso 3.....	36
5.4 – Novos materiais para indústria de óleo e gás.....	39
6. Conclusão.....	41
Referências.....	42

1. Introdução

O setor que investe massivamente em manutenção para prevenção de falhas mecânicas é o de óleo e gás. Esse setor, tanto pelos seus processos quanto por seus locais de instalação de plantas produtivas, gera um ambiente com condições de temperatura, tensão, alcalinidade, entre outros fatores que, somado a um processo produtivo intermitente, faz com que os materiais metálicos empregados nos equipamentos de processo tenham sua vida útil reduzida. Por isso, as indústrias petrolíferas gastam boa parte do seu orçamento anual com manutenção industrial, a fim de prever paradas não programadas na produção, para substituição de equipamentos e peças, e também, para evitar que desastres sejam causados por falhas catastróficas, podendo levar a perdas humanas e ambientais quase irreparáveis (INSPECTIONEERING, 2019).

Geralmente, no setor de óleo e gás, os materiais metálicos são os mais empregados na fabricação dos equipamentos utilizados em seus processos. Cada etapa de produção e processamento destes materiais, incluindo: a extração do minério, seu processamento e fabricação em lingotes, chapas, e outros produtos primários, contribui para que defeitos sejam criados e, possivelmente, carregados nas etapas de fabricação de um componente. Assim, a presença de defeitos, associada às condições severas de serviço de um componente, podem levar a uma falha do material metálico ao longo do tempo (WILBY, 2009).

É de extrema importância, portanto, entender os fatores que possam contribuir para gerar defeitos nos componentes, a partir do entendimento das condições ambientais de serviço no qual os equipamentos estão inseridos, a fim de inibir possíveis falhas estruturais. Compreender esses fatores é parte fundamental do trabalho da engenharia, principalmente, da engenharia de materiais. A partir do entendimento destes fatores, é possível designar o tempo de vida em serviço de cada material, sob determinadas condições em serviço, para assim, indicar o tipo de manutenção industrial mais adequada, particularmente utilizados na fabricação dos maquinários da indústria petrolífera (FRANÇA, 2016).

2. Objetivos e justificativas

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura para mostrar que estudo de falhas mecânicas na indústria de óleo e gás é importante, motivo esse que possibilita prevenir e/ou corrigir processos que possam acarretar em quebras de equipamentos ou acidentes. Para isto, são objetivos específicos do trabalho:

- identificar quais falhas mecânicas tem maior ocorrência no setor;
- criar um entendimento aprofundado por meio de estudos de casos sobre quais fatores do processo ou do condições de serviços dos equipamentos da indústria petrolífera que contribuem na geração dos defeitos e culminam nas falhas nos materiais empregados;
- avaliar, por análise da falha ocorrida, as sugestões de melhoria que podemos subtrair do estudo, e com essas sugestões implementar algum tipo de manutenção ou de procedimentos operacional para prevenção de novas ocorrências;
- apresentar materiais para esse setor, que são desenvolvidos com melhores propriedades mecânicas, térmicas, químicas e bioquímicas, para sua utilização em condições mais severas de serviço

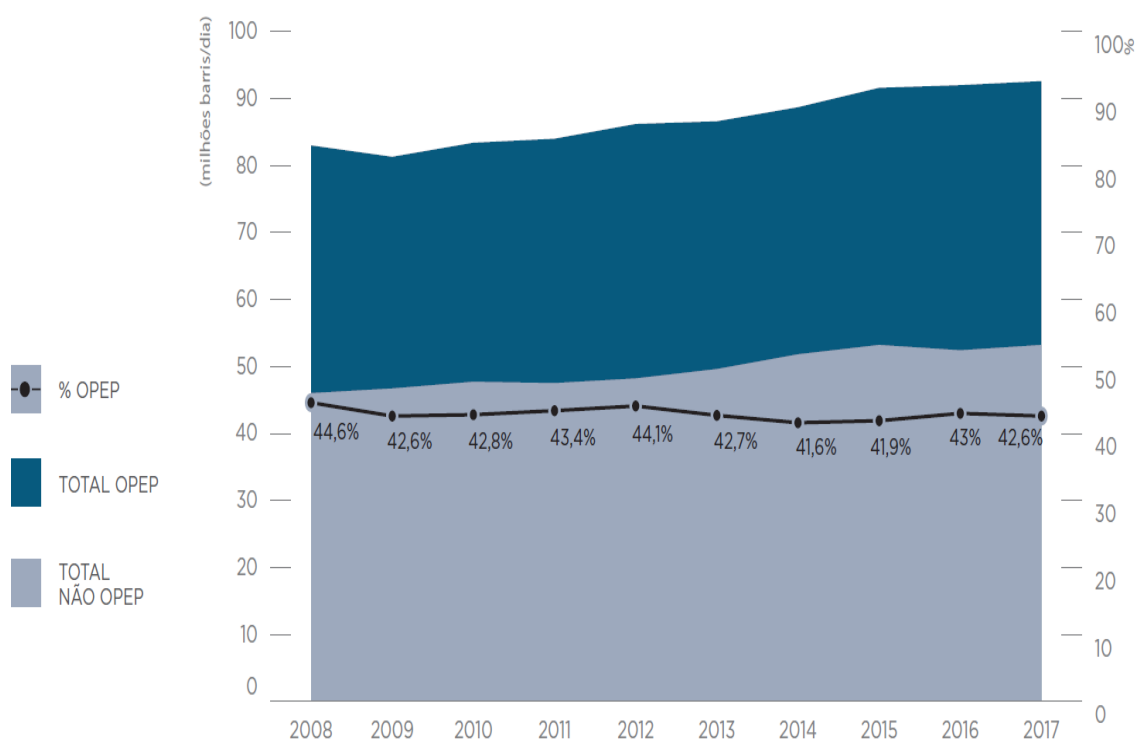
Nas últimas décadas, tanto no Brasil como nos demais países, diversos acidentes foram ocasionados pela exploração e refino de petróleo, que custaram vidas e danos ambientais irreparáveis. Parte desses acidentes ocorreram por erros humanos e parte por falhas mecânicas em componentes. Os acidentes causados por falhas mecânicas se deram devido à falta de manutenção adequada nas refinarias e plataformas, como, por exemplo, no caso do acidente brasileiro da P-36 (2001) associado a falha mecânica da válvula do tanque de drenagem (ANP, 2001). Por isso, faz-se necessário o entendimento dos fatores que podem levar às falhas e qual a manutenção mais adequada para cada caso identificado (JORNAL PELICANO, 2019).

3. Revisão da Literatura

3.1 - Panorama internacional e nacional da produção e consumo de óleo e gás

O mundo está, aos poucos, se adaptando às mudanças de consumo e utilização de fontes de energia, tanto para uso doméstico como industrial. Com o objetivo de tornar o uso de recursos no planeta mais sustentável, muitos países têm colocado seu foco em mudar suas matrizes energéticas de fontes não renováveis para as de fontes renováveis. Apesar disso, dados mostram um aumento na demanda de energia gerada pelo desenvolvimento econômico, com registro crescente na produção de petróleo no mundo, passando entre 2016 para 2017, de 92 milhões de barris/dia para 92.625 milhões de barris/dia, evolução de 0,7% ao ano, contabilizado também, a produção de líquido do gás natural, segundo a Agencia Nacional do Petróleo (ANP-MME, 2018). A Figura 1 mostra a evolução do crescimento da produção mundial de petróleo entre 2008 e 2017 (ANP, 2018).

Figura 1 – Crescimento da Produção Mundial de Petróleo entre 2008 – 2017.



Fonte: Adaptado de BP, 2018.

Observa-se, nos países que compõem a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), um decréscimo de 0,42% na produção do combustível, em relação ao ano anterior. Entretanto, observou-se um acréscimo de 1,51% na produção dos países não pertencentes à OPEP, crescimento justificado pelo aumento do consumo gerado no desenvolvimento econômico de alguns países como, Estados Unidos e China. Dos 98,2 milhões de barris/dia consumidos em 2017, em primeiro lugar de consumo vem os Estados Unidos, com 20,2%, seguido da China, com 13%. O Brasil ocupa a sétima posição, com cerca de 3,1% no consumo em 2017 (ANP-MEE, 2018). A Tabela 1 sintetiza os dados de consumo por regiões geográficas entre 2008 e 2017 (BP, 2018).

Tabela 1 – Consumo de Petróleo por regiões geográficas de 2008 – 2017.

REGIÕES GEOGRÁFICAS, PAÍSES E BLOCOS ECONÔMICOS	CONSUMO DE PETRÓLEO (MIL BARRIS/DIA)										17/16 %
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
TOTAL	86.515	85.587	88.535	89.561	90.509	92.088	92.986	94.843	96.488	98.186	1,76
América do Norte	23.868	22.967	23.526	23.329	22.915	23.379	23.465	23.818	24.065	24.219	0,64
Canadá	2.297	2.174	2.306	2.381	2.342	2.383	2.399	2.348	2.401	2.428	1,15
Estados Unidos	19.490	18.771	19.180	18.882	18.490	18.961	19.106	19.531	19.687	19.880	0,98
México	2.080	2.021	2.040	2.065	2.083	2.034	1.960	1.939	1.977	1.910	-3,38
Américas Central e do Sul	6.032	6.006	6.334	6.570	6.742	6.987	7.058	7.021	6.811	6.794	-0,24
Argentina	540	532	594	609	636	683	673	696	687	670	-2,44
Brasil	2.481	2.498	2.716	2.839	2.915	3.124	3.242	3.181	3.013	3.017	0,13
Chile	390	383	343	371	376	362	353	355	376	383	1,80
Colômbia	251	232	258	277	297	298	316	330	339	344	1,50
Equador	188	191	220	226	233	247	260	254	240	237	-1,09
Peru	172	178	189	208	213	227	225	239	254	259	2,00
Trinidad e Tobago	45	44	45	42	40	45	42	46	45	44	-1,70
Venezuela	716	726	725	737	792	782	720	637	539	505	-6,41
Outros	1.248	1.223	1.244	1.262	1.241	1.218	1.227	1.283	1.319	1.336	1,30

Fonte: Adaptado de BP, 2018.

No Brasil, a extração de petróleo vem mantendo-se em ritmo praticamente constante, com algumas quedas em anos de baixo desenvolvimento da economia. Porém, logo após esses períodos, a produção é retomada para os níveis estáveis de anos anteriores. O crescimento produtivo de petróleo nacional no ano de 2017 foi de 4,2%, sendo esse crescimento registrado por 4 anos consecutivos. Seguindo o mesmo ritmo de crescimento, o gás natural teve um aumento de 5,9% em sua produção nacional (ANP, 2018). Toda extração e produção foram alavancadas pelo consumo interno, que para ano de 2017, teve uma expansão de 0,13%.

O avanço da extração, produção e consumo de petróleo no Brasil exige que as plataformas *onshore* (produção em terra) e *offshore* (produção em mar), e também as refinarias, tenham um processo de extração e produção intermitente. Este fato aumenta o risco de falha em materiais metálicos empregados em equipamentos utilizados nos processos, submetidos a trabalho sob cargas cíclicas, tensão constante, altas temperaturas de serviços e contato com ambientes ou líquidos corrosivos; fazendo com que seja necessária a realização de manutenção constante nesses equipamentos (NASPOLINI, 2018).

3.2 – Manutenção Industrial de Equipamentos

A manutenção constante de equipamentos é de extrema importância nos mais diversos setores industriais, principalmente, para o setor de óleo e gás, no qual uma falha mecânica do material empregado pode causar desastres de grandes proporções, podendo levar a perdas humanas, ambientais ou produtivas. A manutenção industrial tem como objetivos o diagnóstico, execução, comissionamento e prevenção de avarias, maximizando a vida útil de materiais metálicos de peças em condições adversas de uso (INDUFITMACHINE, 2019). O diagnóstico antecipado de substituição e correção reduz o número de paradas completas ou parciais das instalações e processos que, por consequências, aumentam a produtividade e o lucro da companhia.

Para melhor atender os diversos tipos de falhas que podem ocorrer nos equipamentos, a manutenção industrial é dividida e classificada nos seguintes tipos: manutenção corretiva, preventiva, preditiva e detectiva (ENGETELES, 2019).

3.2.1 - Manutenção Corretiva

É a forma mais primordial e simples de manutenção, utilizada depois de atingida a vida útil do equipamento. Assim, os processos ocorrem continuamente até que ocorra a falha do equipamento, para assim realizar-se a manutenção (SLACK, 2002). Essa manutenção se subdivide em duas outras categorias: corretiva planejada e não planejada. Na corretiva planejada, a manutenção é feita com preparo, programação e tomada de decisão prévia, ou seja, o procedimento operacional antecipado prevê a utilização do maquinário até sua falha, ou o acompanhamento preditivo dos componentes. Esse tipo de manutenção, apesar de simples, geralmente requer custos elevados, associados a necessidade de estoque de peças de substituição, trabalho extra, custo de ociosidade da máquina e menor disponibilidade produtiva (ALMEIDA, 2000).

Já na manutenção não planejada, a correção da falha ou do baixo desempenho produtivo, observados após a ocorrência dos mesmos, são realizados, aleatoriamente, sem acompanhamento ou planejamento prévios. O não planejamento resulta em altos custos e baixa confiabilidade de produção, em função da ociosidade e maiores danos aos equipamentos, que muitas vezes podem ser irreversíveis (OTANI & MACHADO, 2008).

3.2.2 - Manutenção Preventiva

É a manutenção direcionada para evitar que a falha ocorra, considerando intervalos de tempo pré-definidos para realizar manutenções. Seu objetivo é eliminar ou reduzir a probabilidade de ocorrências de falhas por ausência de manutenção, seja por falta de limpeza, lubrificação, substituição e verificação de componentes das instalações em períodos previamente planejados (SLACK, 2002).

Esse tipo de manutenção, no entanto, deixa de avaliar os fatores específicos de cada planta industrial que afetam diretamente a vida operacional da maquinaria em condições normais. Segundo Almeida (2000), o tempo médio entre ocorrência de falhas não será o mesmo, por exemplo, ao comparar uma bomba que esteja trabalhando com água, e outra com polpas abrasivas de minério. Ao deixar de avaliar os fatores específicos da instalação, optando-se pela manutenção preventiva, dois problemas mais comuns podem ocorrer: reparos desnecessários ou bastante antecipados e falhas inesperadas (ALMEIDA, 2000) que, por consequência, aumentam a despesa com manutenção e encarece o preço do produto final.

3.2.3 - Manutenção Preditiva

É a manutenção que, por meio da medição de informações coletadas por instrumentação, tenta definir o estado futuro de um equipamento ou sistema (ENGETELES, 2019). Dentre suas vantagens estão o controle das máquinas que apresentam início de mau funcionamento, controle de qualidade de manutenções, garantia de certificação de qualidade, históricos de informações sobre cada equipamento, melhor programa de ações de manutenção, controle de matérias-primas, aumento da variabilidade da planta industrial, segurança da fábrica, maior qualidade de produtos, redução de custos com manutenção corretiva, e redução no consumo de energia (CARNERO, 2003).

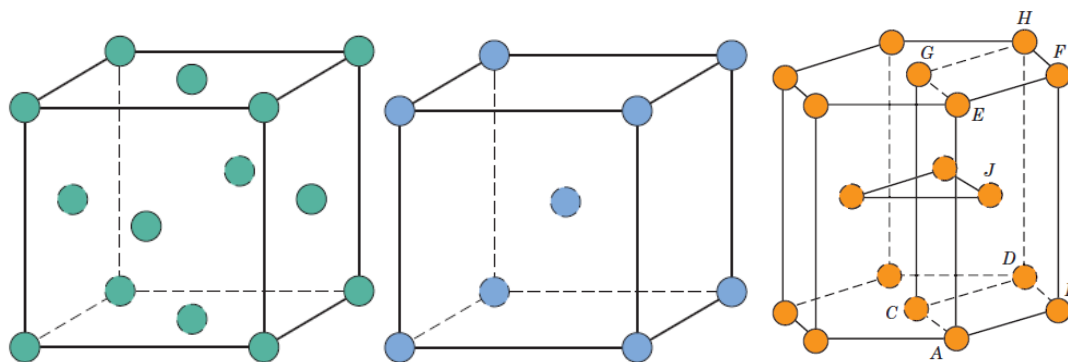
3.2.4 - Manutenção Detectiva

Manutenção detectiva tem como foco vários maquinários e tipos de falhas que não podem ser incluídas nos outros tipos tradicionais de manutenção, inclusive as falhas ocultas, não evidenciadas em condições normais de uso do componente, ou as que afetam os dispositivos e sistemas protetores destes componentes. Cerca de 40% das falhas são categorizadas como falhas ocultas, e em 80% dos casos, é necessário averiguação da falha. (LUCATELLI, 2002).

3.3 – Defeitos presentes em materiais metálicos

Os materiais metálicos são classificados como sólidos cristalinos, devido aos seus átomos estarem organizados em arranjos periódicos tridimensionais por longas distâncias. Esses arranjos atômicos periódicos e tridimensionais são chamados de estruturas cristalinas, sendo convenientemente subdivididas em menores unidades de repetição, conhecidas como células unitárias. Para a maioria dos metais, as células unitárias mais comuns são arranjos de três tipos (Figura 2): Cúbica de Face Centrada (CFC), Cúbica de Corpo Centrado (CCC) e Hexagonal Compacta (HC) (CALLISTER, 2009).

Figura 2 – Estruturas Cristalinas CFC, CCC e HC



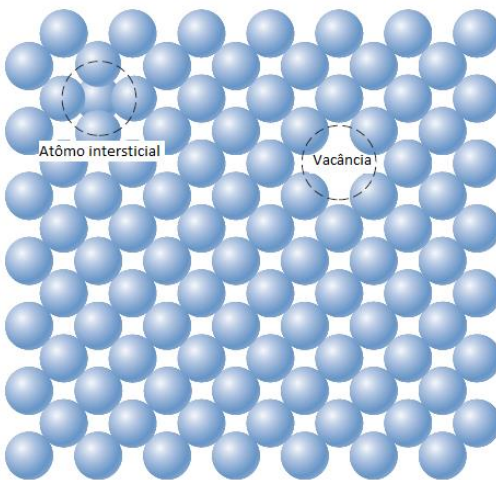
Fonte: CALLISTER, 2009

Quando todas as estruturas cristalinas de um metal estão alinhadas em uma única direção sem interrupção em longo alcance, tem-se um arranjo atômico conhecido como monocristal ou material monocristalino. Entretanto, quando o arranjo muda de direção constantemente, surgem os chamados grãos, onde, o conjunto de diversos grãos de arranjos atômicos em diferentes direções, formam os materiais policristalinos (CALLISTER, 2009).

Embora em teoria, os sólidos cristalinos possam ser arranjos perfeitos, na realidade em escala atômica essa ordenação perfeita não existe. Todos metais possuem algum tipo de defeito ou imperfeição, os quais são classificados em defeitos pontuais, lineares, interfaciais e volumétricos (CALLISTER, 2009).

Os defeitos pontuais mais conhecidos são as vacâncias, que são defeitos nos quais ocorre a ausência de um átomo no arranjo da estrutura cristalina. A existência das vacâncias é explicada por princípios da termodinâmica e de entropia do cristal (CALLISTER, 2009). Outro defeito pontual comum é o átomo intersticial, que ocorre quando um átomo ocupa um lugar no arranjo organizado que, em circunstâncias normais, seria um espaço vazio entre átomos vizinhos (CALLISTER, 2009). A Figura 3 mostra o esquema de uma estrutura cristalina com a presença destes defeitos.

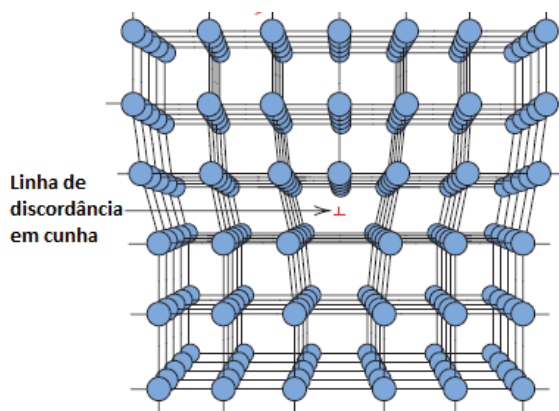
Figura 3 - Estrutura cristalina com presença de átomo intersticial e vacância



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2009.

As discordâncias são defeitos lineares em torno do qual alguns átomos estão desalinhados com os adjacentes, e podem ocorrer em cunha ou em hélice. As discordâncias em cunhas são definidas como uma linha ou aresta que representa o fim de um semi-plano extra de átomos na rede cristalina (Figura 4).

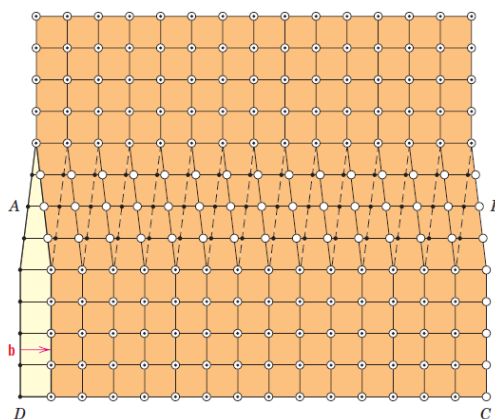
Figura 4 – Representação da discordância em cunha no final do plano extra de átomos.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2009.

Já as discordâncias em hélice se originam quando uma tensão de cisalhamento é aplicada no cristal, no qual uma região se desloca uma distância atômica em relação a outra região, o que origina, assim, seu nome em função do caminho helicoidal ou espiral que é traçado em torno da linha de discordância pelos planos de átomos (Figura 5).

Figura 5 - Representação da linha de discordância em hélice “Linha AB”.



Fonte: CALLISTER, 2009.

No geral, todos os materiais cristalinos apresentam discordâncias que são geradas como consequências do processo de solidificação, deformação plástica ou estresse térmico do material, e na maioria dos casos, não se apresentam na sua forma pura, como cunha ou hélice, mas sim, na forma de uma mistura entre os dois tipos de discordâncias, chamada de discordância mista (CALLISTER, 2009).

Os defeitos interfaciais são os bidimensionais e geralmente separam regiões em um material com diferentes estruturas cristalinas ou orientações cristalográficas, chamados de contornos. Incluem em sua categoria: a superfície externa, contornos de grãos, contornos de fase e contornos de maclas. A superfície externa é o defeito presente em todos materiais cristalinos, onde ocorre o término da estrutura do cristal, além de ser um contorno que se estende por todo material. O contorno de grão é a região que separa dois grãos com diferentes orientações cristalográficas. Nas ligas multifásicas os contornos de fases se originam pela diferença física e química dos constituintes das fases. Por fim, os contornos de maclas são regiões nas quais a posição de alguns átomos de um lado possui uma imagem espelhada com átomos do outro lado do contorno (CALLISTER, 2009).

Por fim, os defeitos volumétricos estão presentes em todos materiais sólidos e são muito maiores que os outros tipos de defeitos. Nessa categoria incluem-se os poros, trincas, inclusões e outras compostos presentes nos materiais. Geralmente, esses tipos de defeitos surgem durante as etapas de processamento dos materiais metálicos (CALLISTER, 2009).

3.4 – Tipos de Falhas Mecânicas que ocorrem em materiais empregados no setor de óleo e gás

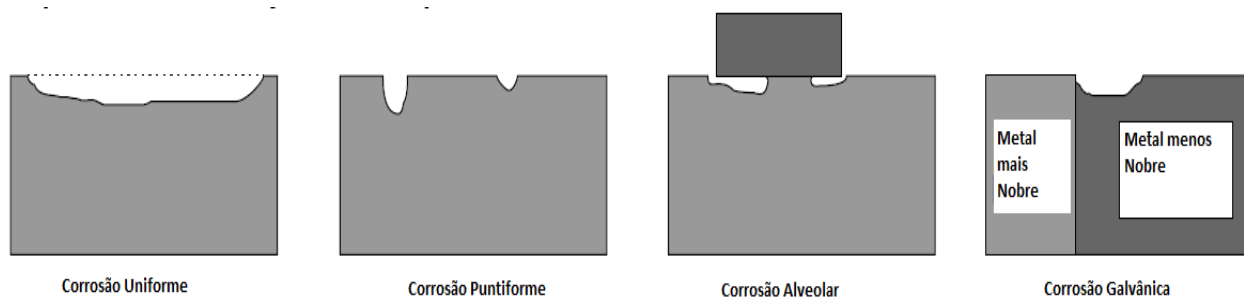
Na indústria de óleo e gás, as falhas mecânicas que podem ocorrer nos materiais advêm de condições variadas, devido à quantidade de condições ambientais adversas que os componentes estão submetidos durante um processo industrial. Dentre as falhas que mais ocorrem nessa indústria, 33% correspondem as causadas por corrosão de todos os tipos, 18% por fadiga, 14% por dano mecânico e sobrecarga, 9% fratura frágil, 9% defeitos de fabricação, 7% por defeitos de solda e 10% por outros motivos (KERMANI, 1996).

3.4.1 – Corrosão

Em geral, a corrosão é um fenômeno espontâneo, no qual os materiais metálicos tendem a voltar ao seu estado natural (minérios), por meio de sua deterioração por ação química ou eletroquímica do ambiente, e pode estar associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1995). Em razão dos diversos tipos de meios operacionais, a corrosão se apresenta de diversas formas, sendo classificadas em três grupos principais, em função de sua identificação no material: 1 –

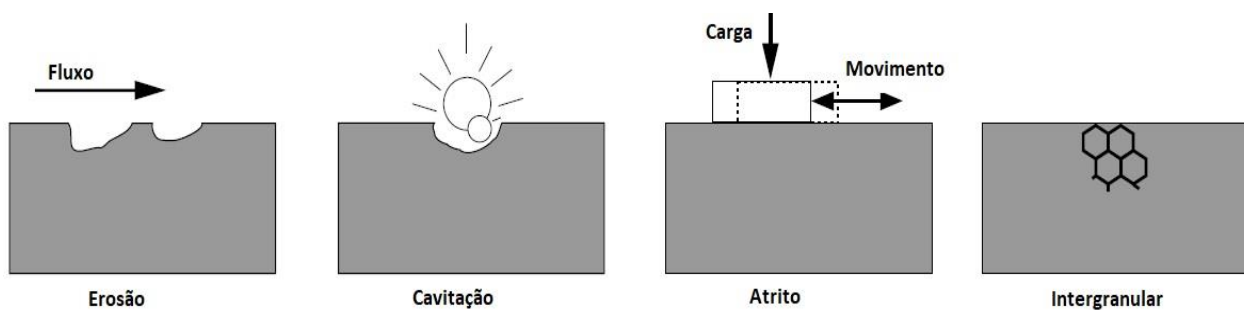
identificáveis por inspeção visual, 2 – requerem inspeção suplementar e 3 - inspeção requer microscopia (Figuras 6-8).

Figura 6 – Tipos de corrosão identificáveis por inspeção visual.



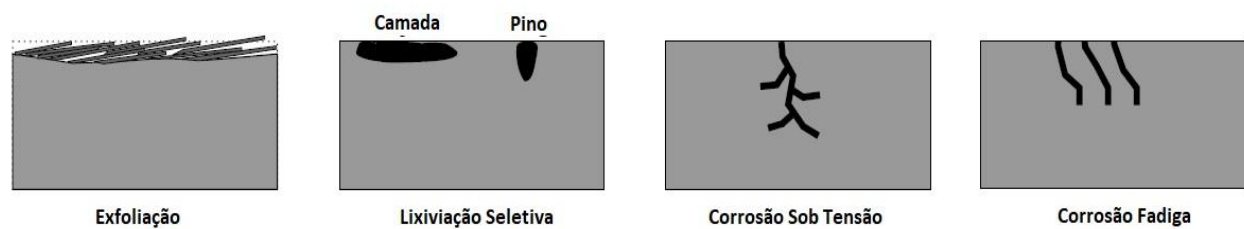
Fonte: Adaptado de ROBERGE, 2000.

Figura 7 – Tipos de Corrosão que requerem inspeção suplementar.



Fonte: Adaptado de ROBERGE, 2000.

Figura 8 – Tipos de corrosão que sua inspeção requer micrografia.



Fonte: Adaptado de ROBERGE, 2000.

3.4.2 – Fadiga

Estimativas apontam que a maior parte das falhas de peças metálicas em serviço, cerca de 90%, são causadas por fadiga. Estas falhas ocorrem devido a alguns fatores presentes nas condições operacionais em que as peças são submetidas, como tensão de tração, carregamento cíclico ou de

amplitude alternada, e deformação plástica em cada ciclo. As falhas por fadiga, depois de determinado número de ciclos, indicam que em cada ciclo, certa deformação plástica é produzida no material (HOSFORD, 2005).

A fadiga é dividida em estágios e considera, primeiramente, (i) a nucleação da trinca pelo acúmulo de deformação plástica a nível microscópico, em seguida, (ii) o baixo crescimento da trinca por tensão cíclica, e em terceiro, (iii) a fratura do material quando a trinca atinge um tamanho crítico. (HOSFORD, 2005).

3.4.3 - Dano Mecânico e sobrecarga

Em geral, danos mecânicos gerados em equipamentos são originados por algum tipo de ação mecânica como (CORROSIONPEDIA, 2019):

- impacto, causado por projéteis ou ferramentas de maior dureza;
- corte, gerado pela perda local de material, devido a ação de uma ferramenta cortante;
- risco, perda superficial de material em forma de linha pela ação de um objeto pontiagudo;
- abrasão, causada pela fricção entre componentes ou partículas;
- chaveamento, danos de impactos causados por ferramenta pontiaguda com intuito de gerar uma superfície irregular para fixação de outro material.

Os danos mecânicos resultam em mudança de forma e alinhamento das peças, alterações de suas propriedades, mudanças na distribuição de tensões e criação de novos concentradores de tensão, indução de defeitos e anomalias nas peças (CORROSIONPEDIA, 2019).

Outro tipo de dano observado em equipamentos advém de uma sobrecarga. Uma sobrecarga é gerada quando uma carga imposta em determinada região produz uma tensão de tração ou cisalhamento no material que seja acima do seu limite de escoamento, que leva ao acúmulo de deformação plástica e à fratura do material (HOSFORD, 2005).

3.4.4 – Fratura frágil

Existem dois modos de fratura para os materiais metálicos, a dúctil e a frágil, classificação baseada na capacidade intrínseca do metal em deformar plasticamente até sua ruptura (HOSFORD, 2005). Quando metais apresentam fratura dúctil, é perceptível a mudança no comprimento e redução de área transversal causada pela grande capacidade de se deformarem plasticamente, sinais que antecipadamente demonstram que a falha dúctil está eminente de ocorrer. A fratura frágil é a

que apresenta maior risco para peças de equipamentos no geral, pois, ocorre pela rápida propagação de trincas transgranulares ou intragranulares, com a presença de uma deformação plástica muito pequena ou até mesmo sem sua presença. Neste caso, a trinca se propaga perpendicularmente à direção da aplicação da tensão mecânica, sem demonstrar sinais visuais de sua presença (CALLISTER, 2009).

3.4.5 – Defeito de fabricação

Como mencionado, desde a sua extração, como minério, até a etapa de uso de um material metálico, defeitos são criados pelas etapas de produção, processamento e emprego. Quando defeitos surgem nas primeiras etapas de produção ou processamento do metal, estes podem ser o princípio de uma falha, uma vez que podem continuar a existir em etapas posteriores do processo de fabricação de componentes ou equipamentos. Geralmente, esses defeitos, chamados de inerentes, são resultantes de complexos processos operacionais metalúrgicos, químicos e físicos que o metal é submetido (WILBY, 2009).

Os principais defeitos de fabricação de componentes e equipamentos são classificados em dois tipos: os que tem origem nos processos primários de produção de um material metálico, em seu estado fundido; e os que tem origem no metal sólido em processamento. Os defeitos com origem nos processos primeiros de produção de metais são conhecidos como segregação, porosidade, inclusões, vazios de retração e lágrimas quentes. Já os defeitos gerados durante o processamento de um metal sólido são classificados como trincas, defeitos superficiais, tensão residual e fragilização por hidrogênio (WILBY, 2009).

3.4.6 – Defeito de Solda

A operação de soldagem por fusão consiste no aquecimento intenso e localizado de uma região para unir duas peças distintas, gerando um gradiente de temperatura na região soldada e na região adjacente. Dessa forma, a dilatação do metal não é homogênea, devido ao gradiente de temperatura nestas regiões, originando assim, deformações plásticas e elásticas no metal soldado. Como resultado, criam-se tensões residuais e distorções na região da junta (MARQUES, 2009).

Além disso, na região soldada, conhecido como cordão de solda, as propriedades mecânicas do material são modificadas, podendo aumentar a chance de causar falhas por fatores, como

presença de tensões residuais de tração e irregularidades superficiais nessa região, que resultam em um efeito negativo para resistência à fadiga (MARQUES, 2009).

Outro fator negativo, presente em regiões soldadas, é a criação de uma estrutura monolítica sem interface entre o cordão e sua região adjacente, de forma a interromper uma propagação de trincas. Finalmente, outros defeitos de soldagem incluem: alterações no tamanho de grão no cordão de solda, que podem alterar a tenacidade local; descontinuidades, que incluem trincas e inclusões de escória, que podem concentrar tensões e iniciar uma fratura frágil; e corrosão sob tensão na região da solda, com o desenvolvimento acelerado de trincas pela presença de tensões residuais de tração (MARQUES, 2009).

4. Material e métodos

Para a realização do trabalho foram utilizados dados internacionais de organizações, que fazem estatísticas do setor de energia, e dados Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural Brasileira, para contextualização, análise da importância, tamanho, e sua perspectiva de crescimento do setor. Para o entendimento sobre manutenção industrial, defeitos dos materiais metálicos, tipos de falhas mecânicas, como também novas tecnologias em materiais do setor, foram adotadas diversas referências bibliográficas, considerando artigos científicos de fontes diversas, monografias, dissertações e teses; além de livros e/ou sites de empresas na área específica do tema. Dessa forma, o trabalho está centrado em estudos de casos que têm como base de dados o acervo de artigos do site *OnePetrol* (*ONEPETROL*), para análise de falhas na indústria de óleo e gás, os quais vão reforçar o objetivo do trabalho.

5. Resultados e Discussão

Os estudos de casos que serão apresentados a seguir têm o intuito de reforçar e justificar a importância do estudo das falhas em materiais metálicos na indústria de óleo e gás, mostrar a importância desse estudo na implementação de melhorias nos processos e parâmetros operacionais, através de conclusões subtraídas do estudo de causa da falha, e também numa possível forma de manutenção mais adequada para prevenir a ocorrência de novas falhas.

5.1 – Estudo de Caso 1: Prevenção de corrosão e falha tubular em condensador de enxofre durante operações normais, de início e desligamento em planta de processamento de gás (SAFADOOST, 2014)

Nas plantas industriais de processamento de gás natural, as unidades de recuperação de enxofre são muito importantes para preservação do meio ambiente, pois o enxofre é um subproduto indesejável, presente no gás natural de poços de petróleo. Entretanto, problemas e falhas relacionados aos equipamentos empregados na retirada do enxofre deste gás (SAFADOOST, 2014) podem liberar o sulfeto de hidrogênio na atmosfera, que ao sofrer reação de oxidação, podem gerar produtos e subprodutos causadores de chuvas ácidas, responsáveis por grande dano ambiental (FERNANDO, 1996). A Figura 9 mostra o fluxograma do processo de extração de enxofre que está presente no gás natural (SAFADOOST, 2014):

No estudo reportado por SAFADOOST (2014), ao iniciar o sistema de condensação do enxofre à frio, composto por três estágios principais para sua remoção do gás natural, verificou-se uma severa flutuação no nível de água da concha que regula a temperatura do terceiro condensador no processo, constando de imediato uma ruptura causada por corrosão em um tubo de drenagem e uma severa corrosão nos tubos do segundo condensador, fato que causou um desligamento total da planta de processamento. A pesquisa sobre a corrosão foi realizada a partir do segundo condensador, onde constatou-se que o agente causador foi ataque por ácido sulfúrico. Dessa forma, buscou-se investigar o mecanismo de formação de ácido nos catalisadores do conversor nº2. Os resultados da pesquisa indicaram que o gás combustível na fornalha, estava sendo injetado com excesso de oxigênio durante sua operação de iniciação. Esse oxigênio, juntamente com vapor de água presente no ar estava misturando-se ao enxofre presente nos catalisadores do conversor nº2, proporcionou a formação do ácido sulfúrico, o qual atacou quimicamente parte catalisador no conversor nº2 e o condensador nº2 por corrosão uniforme, tanto em seu suporte como também em algumas partes do refratário da fornalha, liberando diversos minerais que juntamente com o ácido, promoveram a corrosão dos tubos nos condensadores nº2 e nº3 (SAFADOOST, 2014).

Na continuidade do estudo, a partir da pesquisa sobre a corrosão do tubo fraturado no terceiro condensador, foi verificado que o mecanismo de corrosão era diferente, sendo que esse ocorreu pela presença de ferro-enxofre, verificado pela presença e formação de escamas minerais, essas oriundas do ataque corrosivo no refratário da fornalha e catalisadores, as quais foram carregadas pelo gás ao longo do processo até o terceiro condensador (SAFADOOST, 2014). Assim com a presença dessas escamas minerais, somadas ao enxofre condensado, e ao vapor de água, este presente no ar injetado em excesso nas primeiras etapas, formaram uma célula eletrolítica, propícia à corrosão pela presença de ferro-enxofre, gerando compostos FeS_x . A presença destes compostos acelera a taxa de corrosão do componente, uma vez que é inorgânico e, portanto, conduz elétrons entre ferro e enxofre (SAFADOOST, 2014).

Finalmente a partir da análise dos diferentes agentes causadores de corrosão nos diferentes componentes do processo foram elencadas as seguintes sugestões (SAFADOOST, 2014):

- monitoramento de água. pressão e temperatura no material condensado, a fim de correlacionar com a flutuação identificada com uma possível falha de equipamentos no sistema.

- o monitoramento permanente da pressão na casca do condensador e do seu nível de água, para verificar se a operação de desligamento foi feita corretamente.
- regularmente checar de forma visual a produção de enxofre no condensador para saber o tempo certo de realizar o seu desligamento.
- atenção ao excesso de oxigênio durante a iniciação do sistema, quando o conversor estiver suficientemente frio para condensar as moléculas de água presente no gás.
- aquecimento da fornalha em taxa recomendada pelo fabricante, a fim de evitar a falha e ataque químico no refratário, formação de escama e acúmulo de enxofre nos condensadores.

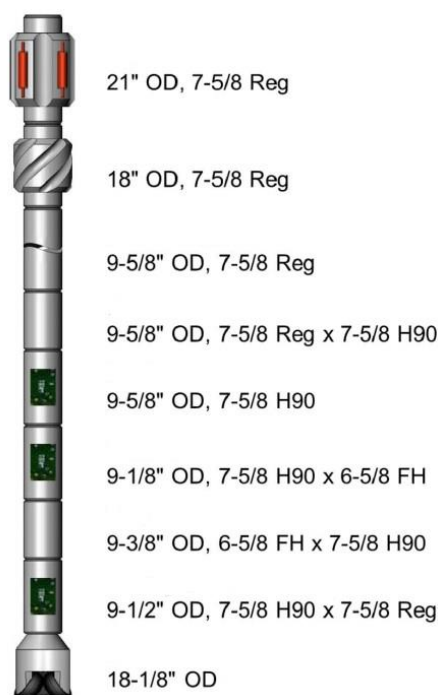
As sugestões de melhoria encontradas pelo estudo da falha realizado por SAFADOOST (2014) são exemplos da importância desse tipo de estudo para gerar propostas de melhorias e correções, tanto em como deve ser realizada a operação do sistema de extração de enxofre, como na forma da manutenção, controle e inspeção dos parâmetros de serviços dos equipamentos utilizados nos processos, o que permite evitar que os materiais dos equipamentos falhem antes de uma determinada vida útil e que causem danos ambientais e humanos.

5.2 – Estudo de Caso 2: Prevenção de Falha de Torque Reativo (PETTIT, G; 2018)

Na extração do petróleo bruto é comum a utilização de operações, utilizam-se das brocas com alargadores de buracos, as quais são de extrema importância no processo, pois permitem aumentar o diâmetro dos buracos com poucos passos operacionais. Entretanto, durante os processos de perfuração, observa-se, com certa frequência, a ocorrência de falhas mecânicas inesperadas da broca, que na maioria das vezes são causadas por torque reativo, e ocorrem quando repentinamente a broca para de girar durante a perfuração do solo (PETTIT, 2018). Ao ocorrer a parada repentina de algum componente estrutural da broca que estava rotacionando no sentido horário (direito), pelo efeito da inércia rotacional, todos componentes abaixo com massa e rotação tentarão continuar seu movimento no sentido horário, assim esses vão gerar um torque reativo de sentido contrário a rotação da broca, ou seja, no sentido anti-horário (esquerdo) no componente estático, que irá percorrer todo componente da broca tentando para seu movimento rotacional, e se esse torque reativo (anti-horário) gerado pela inércia rotacional for de valor alto o suficiente para algum componente estrutural, isso pode acarretar em sua falha mecânica (PETTIT, 2018).

No presente estudo, foi reportado que durante uma operação de perfuração, uma broca com ponta de diâmetro de 18-1/8 polegadas ou 0,454m SI, um alargador de buraco de 21 polegadas ou 0,533m SI, numa velocidade de rotação de 50 rpm, sofreu de uma fratura inesperada durante seu uso. O perfil esquemático da broca e seus componentes conectores são mostrados conforme Figura 10 (PETTIT, 2018):

Figura 10 – Perfil esquemático da broca e identificação de seus componentes conectores



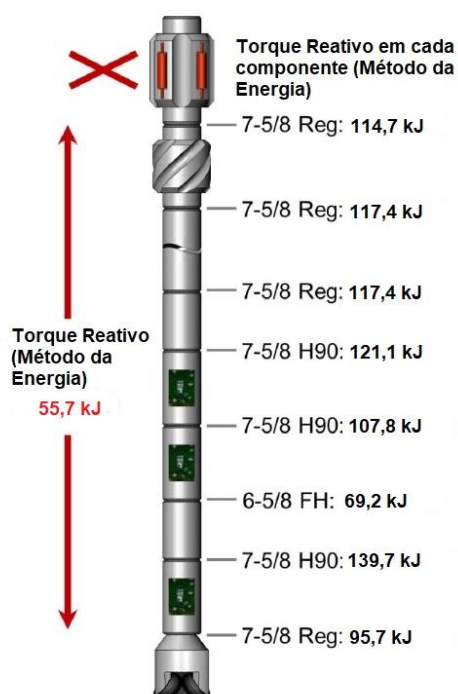
Fonte: Adaptado de PETTIT, 2018.

Embora este tipo de falha seja relativamente comum no processo de perfuração, esta ocorrência em específico surpreendeu os operadores, pois ocorreu em baixa rotação considerando os padrões normais de rotação para perfuração. O estudo apontou que tal falha teve como consequência, um elevado custo de correção, motivo o qual instigou uma investigação mais aprofundada sobre o ocorrido (PETTIT, 2018).

A falha mecânica por torque reativo é um problema essencialmente de sobrecarga no material do componente da broca, no qual o torque reativo de sentido contrário ao giro, gerado quando a broca para instantaneamente, supera o limite de resistência mecânica do material. Para calcular o torque, os projetistas geralmente utilizam do método da conservação de energia, no qual

iguala-se o torque aplicado com o torque reativo que pode ser gerado. No cálculo é preciso fazer as seguintes considerações de contorno: desconsiderar que existe efeito de fricção; desconsiderar que a broca para instantaneamente; e desconsiderar que não existe efeito de vibração, seja ela axial, lateral ou torsional (PETTIT, 2018). Através do método da conservação da energia, chegou-se aos seguintes valores calculados de energia mostrados na Figura 11 (PETTIT, 2018).

Figura 11 – Resultado do Método de Cálculo de Conservação de Energia



Fonte: Adaptado de PETTIT, 2018.

O método de cálculo ao igualar a energia cinética rotacional com a energia potencial torsional, chegou a um resultado de energia do torque reativo total de 55,7 kJ para broca, sendo esse valor abaixo dos valores de energia do torque calculados para cada componente conector, esse fato causa a falsa impressão de segurança que o *design* de projeto da broca estava correto, mas a realidade provou que este não estava, pois ocorreu a falha mecânica no componente de conexão 6-5/8 FH, sendo que a energia do torque reativo máximo permitida no componente de 69,2 kJ (PETTIT, 2018). Apesar desse disso, existem maneiras de melhorar a segurança do projeto considerando o método da energia, como por exemplo: (1) reduzir rotação por minuto máxima permitida para broca; (2) aumentar o fator de segurança dos componentes entre 10% a 15% do

valor de energia do torque reativo esperado para cada um deles; (3) considerar efeito da fricção; (4) reduzir a massa da broca por unidade de comprimento, a fim de reduzir efeito de inércia rotacional e por consequência reduzir o torque reativo (PETTIT, 2018). Entretanto também existem efeitos que pioram a segurança do método da energia e não são considerados no cálculo, como por exemplo: utilização da soldagem ou de resinas epóxi para unir os diversos componentes da ferramenta (PETTIT, 2018).

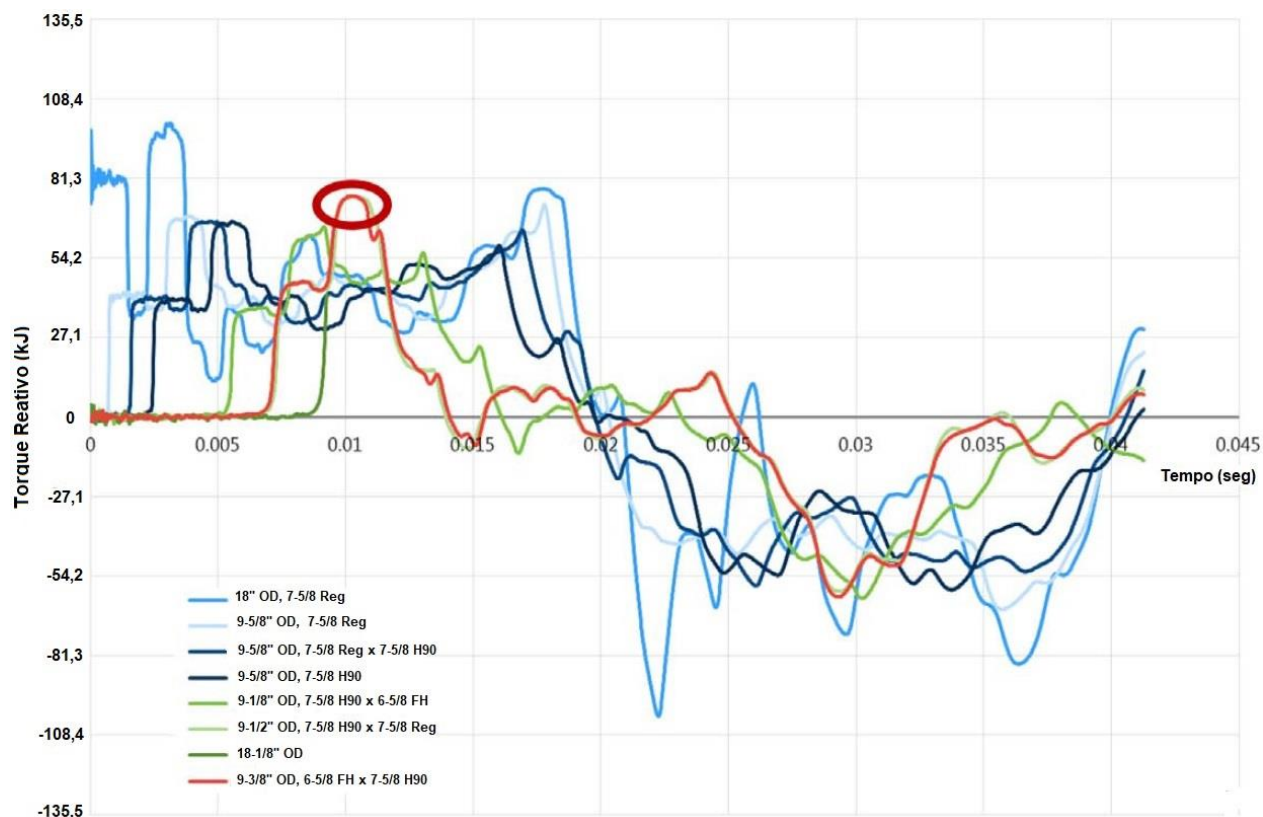
Devido ao método da energia ser muito simplificado, os resultados obtidos podem não ser adequados em situações particulares e complexas, como o ocorrido nesse estudo. Dessa maneira, na revisão da metodologia empregada, observou-se que a não consideração do efeito de vibração torsional foi negligente, e que deveria ter sido levada em consideração na análise, pois geralmente na perfuração de poços a fricção gerada pode reduzir os efeitos da vibração, porém isso depende da largura do poço (PETTIT, 2018). Esse método por ser conservativo e simplificado, considera a broca como uma peça geométrica única e uniforme (cilindro uniforme), que ao ocorrer a parada repentina no seu topo, cria-se um torque reativo de sentido contrário ao giro, com igual valor calculado pelo método da conservação de energia, que percorre a broca como uma onda de choque indo do topo a parte inferior, assim ao chegar a parte inferior é refletido de volta ao topo e em sequência de volta a parte inferior, esse efeito acontece continuamente na ausência da fricção, fato que justifica o seu valor nunca ser maior que a energia do torque reativo máximo permitindo para as conexões de cada componente (PETTIT, 2018).

A complicação que torna esse método da energia ineficaz na maioria dos casos, acontece quando a broca é formada por componentes de tamanhos diferentes (Figura 10), quando o topo para repentinamente, o torque reativo propaga-se como uma onda de choque, que ao chegar na interface entre componentes conectores, parte da energia desse torque é refletido de volta ao topo e outra parte continuada seu caminho até a posição inferior da broca, esse efeito repete-se para cada interface ou conexão de componente, fato que possibilita a criação de um torque reativo resultante, originado por uma interferência construtiva de ondas de choque compostas de diversas energia de torques reativos diferentes, e em algum ponto essa energia do torque reativo resultante pode ser maior que os valores do método da conservação da energia (PETTIT, 2018).

O modelo de cálculo mais adequado a esse tipo broca e operação seria a equação do movimento torsional proposta por Stokey (1988), a qual considera sistemas torcionais-vibracionais e geometrias de brocas com diferentes tamanhos de secções. Um novo cálculo para estudo em

questão foi realizado por aproximação numérica em um algoritmo desenvolvido para o caso, a fim de rastrear quanto torque reativo será aplicado em cada conexão dos componentes, ao realizar o teste com uma quantidade mínima de fricção devido à largura do poço a ser perfurado, chega-se aos resultados da figura 12 (PETTIT, 2018):

Figura 12 – Torque reativo para cada componente da broca considerando efeito da fricção



Fonte: Adaptado de PETTIT, 2018.

Observou-se que, na região circunscrita em vermelho logo após 0,01 segundos, a força do torque reativo total ultrapassa por milésimos de segundo o valor de energia do torque máximo permitido de 69,2 kJ para a conexão do componente 6-5/8 FH, motivo que levou à fratura desse componente (PETTIT, 2018). Este novo modelo de cálculo provou que o método da energia é insuficiente para esse caso, no qual era necessário a troca o componente 6-5/8 FH por outro com maior resistência a energia aplicada pelo torque reativo para o design de projeto da ferramenta de perfuração, bem como também incluir o efeito da fricção por causa do expressiva largura do poço, com isso é possível considerar metodologias de cálculo apropriadas a cada caso, e que o problema

de torque reativo é um problema simples e essencialmente de sobrecarga no projeto (PETTIT, 2018).

Esse estudo realizado por PETTIT (2018), possibilitou pela análise de causa da falha em um dos componentes conectores da broca, além gerar sugestões de correção no parâmetro operacional, também possibilitou a realização ajustes na metodologia de cálculo, a fim de tornar mais seguras as especificações mecânicas de projetos para brocas de perfuração de poços com largura maiores e que sofrem da influência dos efeitos de fricção.

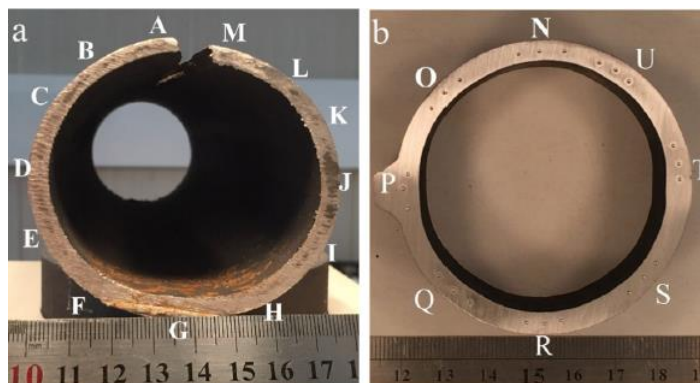
5.3 – Estudo de Caso 3: Análise de falha em tubo de caldeira em planta petroquímica (HOSSEINI, 2019)

O sistema de distribuição e geração de vapor nos processos das plantas petroquímicas tem componentes pressurizados, como as caldeiras e tubos de aquecimento de vapor, os quais geralmente operam em altas temperaturas. O maior problema desse sistema é a falha mecânica dos tubos de aquecimento da caldeira, que geralmente podem ser causadas por diversos fatores (HOSSEINI, 2019).

O alvo do estudo foi investigar as causas de falha em um tubo de caldeira numa planta petroquímica. Para isso, utilizou-se dos seguintes métodos: avaliação macroscópicas no tubo fraturado e em amostra de tubo para controle, também utilizou-se de avaliação por microscópio eletrônico de varredura (MEV), teste de dureza Rockwell B, difração por raios-x (DRX) para composição de fases da área interna da falha do tubo, e análise por elementos finitos (AEF), a fim de descobrir o mecanismo da falha e causa raiz (HOSSEINI, 2019).

A análise macroscópica (inspeção visual) da secção transversal do tubo falhado revelou que área da falha possui um diâmetro 30% menor comparado ao lado oposto, como ilustrado na figura 13 (HOSSEINI, 2019):

Figura 13 – Secção transversal tubo fraturado (a) e tubo controle (b)

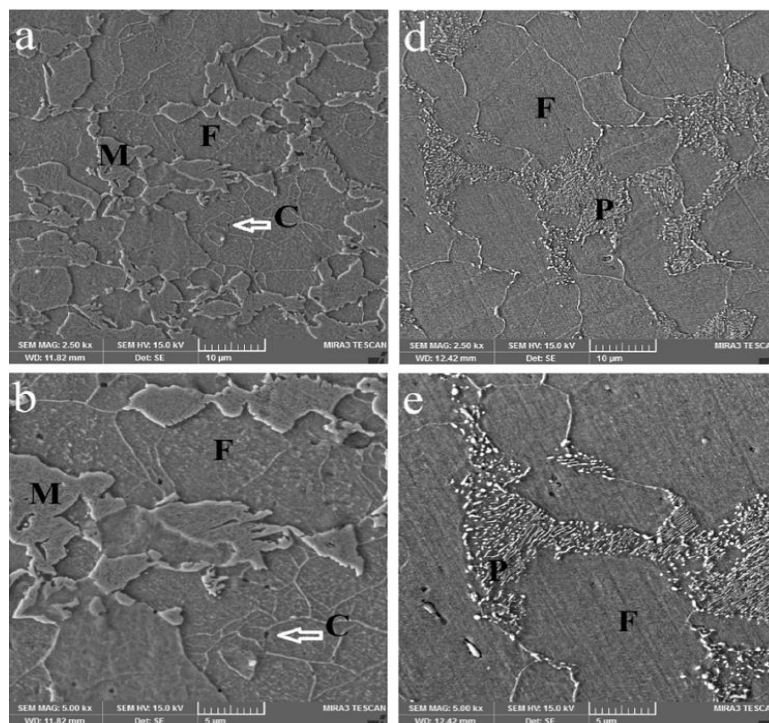


Fonte: HOSSEINI, 2019

Essa diferença visualizada no diâmetro foi relacionada ao superaquecimento de curto prazo no tubo, sendo essa variação na amostra controle menor que 10%, também foi verificada uma ovalidade de 10%, essa confirmada por simulação em AEF (HOSSEINI, 2019).

Na análise por MEV constatou-se que, na região fraturada a microestrutura constituía de blocos de martensita em matriz ferrítica com a presença de alguns carbeto. Entretanto a região oposta à microestrutura constituía-se de ferrita e perlita, estruturas correspondentes a composição química do tubo originalmente (HOSSEINI, 2019), como mostra a figura 14:

Figura 14 – Microscopia da região fraturada (a) e (b) e região oposta (d) e (e)



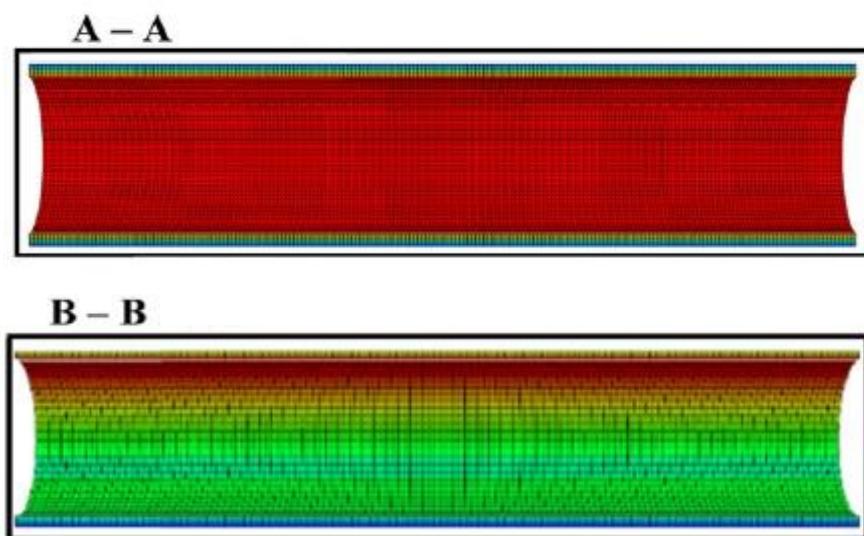
Fonte: HOSSEINI, 2019

O teste de dureza Rockwell B feito na região próxima da falha teve um valor de 94,5HRB, consequência da mudança de microestrutura (martensita) confirmada pela imagem MEV, contudo, na região oposta, o valor de dureza foi de 73,5HRB, de acordo as características da microestrutura padrão da liga (perlita) (HOSSEINI, 2019). A transformação de fase e microestrutura foram evidentes na região da falha, essa transformação ocorre quando o aço atinge a sua faixa de temperatura de transição de fase aos 723°C e esfria rapidamente, esse fato confirma a hipótese que o tubo da caldeira sofreu com superaquecimento por curtos períodos ao longo da operação (HOSSEINI, 2019).

Existia uma dúvida se poderia ter ocorrido corrosão, a qual poderia ter reduzido a espessura do tubo, com isso verificou-se a composição química do vapor, constando que os elementos que poderiam causar corrosão estavam dentro dos parâmetros aceitáveis que não causariam corrosão, mecanismo esse que foi desconsiderado para essa falha (HOSSEINI, 2019).

Os resultados obtidos da AEF demonstram que dois fatores contribuíram para o aumento da tensão: a exposição ao superaquecimento e redução da espessura do material, como visto na figura 13 (HOSSEINI, 2019):

Figura 15 – Simulação AEF para tubo uniforme (A-A) e tubo não uniforme (B-B)



Fonte: Adaptado de HOSSEINI, 2019

A redução da espessura constatada no tubo levou a uma sessão não uniforme, e por consequência, criou diferença nas tensões locais. Esse fator somado ao aumento excessivo de temperatura, gera ainda mais tensão local pelo vapor, num valor de 2.4% na área reduzida, motivos que levaram a ruptura por fratura frágil, (HOSSEINI, 2019). O resultado do DRX encontrou traços de óxidos como hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), evidencia de que a corrosão não levou a essa falha (HOSSEINI, 2019).

O resultado da investigação concluiu que a precisão no controle do fluxo de água da caldeira é de extrema importância para evitar o superaquecimento, que levou ao desgaste e a mudança microestrutural da tubulação, sendo esse fator principal que deve ser monitorado continuamente durante o processo operacional (HOSSEINI, 2019).

O estudo realizado na falha do tubo da caldeira, feito por Hosseini et.al. (2019), possibilitou encontrar a causa raiz do problema, que era um erro no procedimento operacional, e com essa descoberta, foi possível a realização de melhorias no controle do parâmetro operacional da caldeira, sabendo que o monitoramento do controle do fluxo de água durante o processo é o principal fator que evitaria a ocorrência de novas falhas desse tipo.

5.4 – Materiais com melhores propriedades mecânicas para indústria de óleo e gás

A medida que os poços de extração de petróleo mais antigos vão se esgotando, gera-se uma procura por novas áreas de exploração, que agora encontram-se em profundidades maiores no oceano, como por exemplo o caso da exploração da bacia do pré-sal brasileiro, o que faz com que

novas tecnologias em materiais avançados sejam necessárias para tornar viável essa extração, maximizar performance operacional, e reduzir custos nesses poços de grandes profundidades, e que também possibilitem resistir as condições extremas em serviço, como alta pressão e temperatura (CAREJO, 2015).

Os materiais avançados para revestimento, conhecidos como Metálicos Desintegrantes de Alta Resistência (MDAS), são um exemplo dessas novas tecnologias, esses materiais consistem num compósito que possui como sua matriz uma base de pó metálico, no qual seu reforço é uma camada de revestimento nanométrica ou micrométrica de material metálico ou cerâmico, que por meio do controle da microestrutura, composição do revestimento, e de sua espessura, é possível controlar a sua resistência mecânica e também sua taxa de desintegração, características essas que permitem que esse material tenha alta leveza, alta resistência à compressão, desintegração uniforme e controlada, e com propriedades mecânicas customizáveis conforme necessidade da aplicação (CAREJO, 2015).

Os polímeros como poli(éter-cetona) (PEK) e poli(éter-éter-cetona) (PEEK) são muito utilizados na indústria petroleira. Entretanto conforme essa indústria se move para ambientes de condições extremas, os polímeros como PEK e PEEK já atingiram seus limites de performance para esse uso. Com isso novos polímeros, como PEKEKK (poli(éter-cetona-éter-cetona-cetona)) estão sendo testados para esses usos. Esse material possui uma resistência química similar à do PEEK, uma temperatura de transição vítrea bem maior, a qual o proporciona melhores propriedades físicas em alta temperatura, sua resistência a fluência varia de duas vezes a cinco vezes a resistência a fluência do PEEK e PEK. Seu uso na indústria de óleo e gás é adequado para anéis de vedação e conectores elétricos para isolamento de conectividade elétrica (DRAKE, 2014).

As falhas mecânicas em dutos de transporte, tanto de gás com petróleo, dependendo de sua localização, pode ser de grande risco às pessoas que estão próximas, apesar dessas falhas serem raras de ocorrer com uma chance de uma em mil por ano, a indústria de dutos possui um foco especial na pesquisa e desenvolvimento de dutos com melhores propriedades mecânicas (DAHLBERG, 1980). Uma nova resina termoplástica chamada comercialmente de γ -Flex® foi desenvolvida para atingir as melhores propriedades térmicas para dutos flexíveis, essa resina é composta por um homopolímero de difluoreto de polivinilideno de alta massa molecular com 3% em massa de plastificante e 2% de aditivo, com isso esse polímero possui diversas propriedades mecânicas excelentes como: alta resistência a degradação em altas temperaturas, resistência a

ataques químicos diversos, fadiga, e alta flexibilidade em baixas temperaturas, efeito que reduz a tensão no duto em aplicações em grandes profundidades oceânicas (MARION, 2002).

6. Conclusão

As análises citadas nesse trabalho mostram que o estudo aprofundado das falhas em materiais metálicos da indústria de óleo e gás são importantes, pois fornecem ao seu final as recomendações para resolução do problema, e com essas recomendações é possível criar um programa de manutenção adequado, seja do tipo preventiva, preditiva, corretiva ou detectiva, isso conforme a situação exigida pelos parâmetros operacionais extremos ou pelas condições de serviço e ambiente em que os materiais metálicos são expostos. Essas condições operacionais e de serviço extremas, exigidas dos materiais utilizados, são os desafios que os pesquisadores encontram e os mesmos que os motivam a desenvolver e aplicar materiais com propriedades mecânicas necessárias para essa indústria, como alguns dos exemplos citados no presente trabalho, sejam esses materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos, ou compósitos, que são responsáveis por viabilizar projetos, reduzir custos, reduzir a ocorrência de falhas e maximizar performance operacional nessa indústria, do setor energético, de extrema importância nos dias atuais.

Referências

- ALMEIDA, M. T. Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade. 2000. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/16195803-Manutencao-preditiva-confiabilidade-e-qualidade.html>>. Acesso em: 20 set. 2019.
- ANP, MME. Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2018. MME - Ministério de Minas e Energias. Rio de Janeiro: ANP 2008 –2018.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Relatório da Comissão de Investigação ANP/DPC. Análise do acidente com a plataforma P-36. Rio de Janeiro, julho de 2001.
- BP. BP Statistical Review of World Energy, 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>> Acesso em 20 set.2019.
- CALLISTER JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8th Edition. Wiley, 2009.
- CARNERO, M.C. Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. University of Castilla-La Mancha. Ciudad Real, 2003.
- CORROSIONPEDIA. Mechanical Damage. Disponível em: <<https://www.corrosionpedia.com/definition/1455/mechanical-damage>>. Acesso em 17 set. 2019.
- CAREJO, N. Developing A New High-Strength, Lightweight Material Using Nano-Coated Smart Materials for Oilfield Applications. Offshore Technology Conference Brazil. Rio de Janeiro, 2015;
- DRAKE, K. New Polymeric Materials Development for Extreme Environments. Offshore Technology Conference USA. Houston, 2014.
- DAHLBERG, E.P; BRUNO T.V. Analysis of Gas Pipeline Failure. The American Gas Association, 1980.
- EJAZ, M.; MAHMOUD, E.R.I.; KHAN, S.Z. The Investigation of the Fatigue Failure of Nickel-Based Superalloy 718 Choke Valve Stems Used in Offshore Subsea Water Injection Service, *Engineering Failure Analysis* 2020.
- ENGETELES. Manutenção Preditiva: Oque é e como ela pode te ajudar. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/manutencao-preditiva/>>. Acesso em: 24 set.2019.
- ENGETELES. Tipos de Manutenção de acordo com NBR 5462. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/tipos-de-manutencao/>> Acesso em: 2 nov.2019.
- FERNANDO, E. A importância do estudo das chuvas ácidas no contexto da abordagem

climatológica. Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 1996.

FRANÇA, J. E. M. Evolução da Análise de Acidentes em Plataformas de Petróleo Offshore: Dos Equipamentos aos Fatores Humanos. - Seminário Internacional de Confiabilidade da Petrobras, At Rio de Janeiro, Brasil. Novembro 2016.

GENTIL, V. Corrosão. LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora, 3ª ed. Rio de Janeiro 1995.

HOSSEINI, H.R; YAREIEE, S. Failure analysis of boiler tube at a petrochemical plant.

Engineering Failure Analysis, pp. 106: Tehran, Iran 2019.

HOSFORD, W.F. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, Cambridge, 2005, pp. 235-242, pp. 279–307.

INDUFITMACHINE. Idufitmachine Industrial Maintenance Services Company. Disponível em: <<https://www.indufitmachine.com/industrial-maintenance/>>. Acesso em; 20 set. 2019.

INSPECTIONEERING. Failure Analysis in the Oil & Gas Industry. Disponível em: <<https://inspectioneering.com/journal/2013-12-18/3719/failure-analysis-in-the-oil-ga>>. Acesso em 05 nov. 2019.

JORNAL PELICANO. 5 Maiores Acidentes com Plataformas de Petróleo. Disponível em: <<https://www.jornalpelicano.com.br/2014/01/maiores-acidentes-com-plataformas-de-petroleo/>>. Acesso em 09 nov. 2019.

KERMANI, M.B. The Impact of Corrosion on The Oil and Gas Industry. SPE Production & Facilities, August 1996.

LUCATELLI, M.V. et al. Proposta de Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em Equipamentos Médico-Hospitalares. IEB-UFSC. Florianópolis 2002.

MARQUES, P.V. MODENESI, P.J. BRACARENSE, A.Q. Soldagem Fundamentos e Tecnologia 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG 2009.

MARION, A; RIGAUD J. γ-Flex®: A New Material for High Temperature Flexible Pipes. Offshore Technology Conference. Houston, Texas U.S.A., May 2002.

MOREIRA, L.F.S. Otimização da Manutenção em Plataformas Offshore de Exploração e Produção de Petróleo. Luiz Felipe Silva Moreira - Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA 2013.

NASPOLINI, G.F. Prevenção e Resposta ao Derramamento de Petróleo na Exploração e Produção Offshore: Análise Internacional e Recomendações para o Brasil / Giovanna Ferrazzo Naspolini. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

ONEPETROL.; OnePetro is an online library of technical literature for the oil and gas exploration and production (E&P) industry. With contributions from 21 publishing partners and providing access to over 200,000 items, OnePetro.org is the definitive resource on upstream oil and gas. Disponível em: < <https://www.onepetro.org/>>. Acesso em 30 de abril de 2020.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Revista Gestão Industrial*. Vol.4, n.2, 2008.

PETTIT, G. Case Study: Reactive Torque Failure Prevention. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition held in Forth, Texas, 6-8 March 2018.

ROBERGE, P.R. Handbook of Corrosion Engineering. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 2000.

SAFADOOST, A. Preventing corrosion and tube failure in sulfur condenser during normal operation, startup, and shutdown of the south pars gas processing plant. Development & Engineering Management Department, South Pars Gas Complex Company, Assaluyeh, Iran. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 19 (2014) 105-115.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. Administração da Produção. São Paulo: Atlas, 2002.

STOKEY, W. Vibration of Systems Having Distributed Mass and Elasticity. In *Shock & Vibration Handbook*, Third Edition, ed. C. Harris, Chapter 7. McGraw-Hill Book Company 1988.

TYSON, J.A.G; BELL, E.R.G. A case of study evaluation of subsea preferential weld haz corrosion. Society of Petroleum Engineers. UK 1987.

WILBY, A.J. Defects Introduced into metal during fabrication and service. *Materials Science and Engineering Vol III*, 2009.